

TARTU ÜLIKOOL
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia osakond

Kristjan Tamm

KAALI METEORIIDI VÕIMALIK KASUTAMINE SAAREMAA SEPIKODADES

Bakalaureusetöö geoloogias

Juhendaja: Jüri Plado

Tartu 2014

Sisukord

Sisukord.....	2
Sissejuhatus	3
Valimi koostamine Saaremaa muististest.....	6
Noorem pronksiaeg ja vanem rauaaeg.....	6
Keskmine ja noorem rauaaeg	7
Metoodika.....	9
Tulemused	11
Arutelu ja järeldused	21
Kokkuvõte	23
Tänuõnad.....	23
Kasutatud kirjandus.....	24
Summary	26

Sissejuhatus

Saaremaal Kuressaarest 16 kilomeetri kaugusel kirdes asub Kaali kraatriväli. Peakraater on ligi 110-meetrise läbimõõduga ning teda ümbritseb 4–7 meetri kõrgune ringvall. Peakraatrit ümbritseb kaheksa väiksemat satelliitkraatrit, läbimõõduga 13–39 meetrit, nende ringvallid on põlluharimise, teedehituse ning väljakaevamiste käigus tasandunud, muutunud katkendlikuks ja kattunud taimeestikuga (Tiirmaa, 1994).

Kaali kraatri ajalugu on uuritud juba 19. sajandi algusest, mil Johann von Luce kirjutas esimese kirjelduse Kaali peakraatrist. Alates sellest avaldati erinevaid hüpoteese Kaali nähtuse selgitamiseks – näiteks vulkaaniline päritolu, karstumine ning soola või kipsi tektoonika. Täpsema ülevaate saamiseks erinevatest tekketeooriatest vaata Spencer 1938; Aaloe 1963; Raukas jt 2005.

1937. aastal kinnitas J. A. Reinwald satelliitkraatritest meteoriitse raua leidmisega, et tegu on impaktstruktuuriga (Reinwald, 1937). Selle tarbeks tegi Dr. M. H. Heyl samal aastal kahest meteoriidikillust keemilise analüüsi, saades analüüsi põhjal rauasisalduseks 91,5% ja niklit 8,38%, ning tuvastas kildude meteoriitse päritolu. Uuriija Väärismaa tegi meteoriidi tükist sarnased analüüsid, mille tulemusteks oli 84,04% rauda, 6,45% niklit ja lahustumatuid jääke 0,53% (Spencer, 1938).

Lisaks rauale ja niklile leidub Kaali meteoriidis veel haruldasi elemente nagu Ir, Ga, Ge, Re, Pt ja Au (Yavnel, 1976; Kracher *et al.*, 1980). Mineraloogiliste andmete põhjal leidub kildudes raudmeteoriidile omaseid mineraale nagu kamasiiti (96,8%), taeniiti (1,8%) ja šreibersiiti (1,7%) (Yudin *et al.*, 1963). Lähtudes kamasiidi keskmisest sisaldusest meteoriidikildudes, milleks on 96,8%, ning nende kristallide suuruse jäämisest vahemikku 1,5–2,5 millimeetrit, liigitati Kaali meteoriit jämedateraliste oktaedriitide gruppi IA (Spencer 1938, Bronsten 1962, Aaloe 1968).

Lähtudes peakraatri mõõtmetest ning hinnates meteoori ligikaudseks kiiruseks 15–40 km/s, pakkusid V. Bronštein ja K. Stanjukovitš kraatri moodustanud keha algseks massiks 400–1000 tonni. Kokkupõrke hetkeks oli kiirus 10–20 km/s ja taevakeha kaal vähenenud 20 kuni 80 tonnini (Bronsten *et al.*, 1963).

Kuigi Kaali meteoriidi langemissuuna üle on olnud mitmeid eriarvamusi, on üldlevinult vastu võetud kagu-lõunasuunaline trajektoor. Peakraatri tekitanud keha oli kõige raskem ja lendas seega kõige kaugemale ning satelliitkraatrid moodustavad tahajääva langemissuunalise hajumisellipsi (Passey and Melosh 1980).

Kaali kraatrite tekkeaeg pole tänaseks täpselt teada, kindlalt saab ainult väita, et tegu on pärast-jääaegse sündmusega. Kraatri vanuse määramiseks on kasutatud eelkõige kolme erinevat moodust, mis annavad kõik erineva ajalise dateeringu meteoriidi langemisele. Kahest satelliitkraatrist ning Kaali järvest võetud vanimast settekihist proovid pärinevad ajast 1750. aastat eKr, mis määrab ühtlasi meteoriidi langemise aja ülemise piiri (Kessel 1981; Saarse *et al.* 1991; Veski *et al.* 2004; Aaloe *et al.* 1963). Teiseks seostatakse Kaali sündmusega kolmest Saaremaa ja ühest Hiiumaa soo turbakihist pärinevat Si, Ca, Fe ja Ni rikast kihti vanusega 6270–6500 eKr (Raukas *et al.* 1995; Raukas 2000). Kolmandaks seostasid Rasmussen *et al.* (2000) Kaaliga Piila soost leitud Ir rikast kihti, mis pärineb ¹⁴C dateeringust lähtudes vahemikust 400–370 aastat eKr (Veski *et al.* 2001). Kihi vanus muudeti hilisema kriitika tõttu vanemaks – 800–400 aastaks eKr (Raukas *et al.* 2005). Kaali kraatri tekke dateerimisest täpsema ülevaate saamiseks vaata Veski *et al.* 2001; 2004; Raukas *et al.* 2005.

Kui jätta kõrvale Raukase (Raukas *et al.* 1995; Raukas 2000) ajaline dateering, oli Saaremaa Kaali meteoriidi langemishetkeks tõenäoliselt asustatud ning tugev plahvatus jättis kindlasti kohalike elanike mällu emotsionaalse jälje. Kraatri valli väliskülge on teadmata hetkel täiendatud mõne meetri laiuse ja kõrguse paekivimüüri. Lisaks on kraatrist väljaspool veel suurtest maakividest ringvall. Kaali kraatri valli kirdeosas on leitud kultuurikiht, mis pärineb nooremast pronksiajast ja varajasest rauaajast, mida seni on üldiselt peetud vihjeks kindlustatud asulale. Kultuurikihi asukohas on leitud kaks paekivist laotud platvormi, mis võisid olla asula põrandaks. 1976.–1978. aastal paljastasid V. Lõugase juhitud väljakaevamised arvestatava koguse keraamikat, tiigleid, merevaiku, luust odaotsi, lihvimiskive ja mõningaid rauatükke ning šlakikilde. Kultuurikihi ülemisest osast leiti arvatavasti nooremast rooma rauaajast pärinevad neli hõbeeset. Radiosüsinikmeetodi dateeringu alusel pärineb Kaali kindlustatud asula 760.–210. aastast eKr ehk hilispronksiaja ja vanema eelrooma rauaaja vahemikust. Seespool kraatri valli on avastatud veel 17.–18. sajandist pärinev sepikoda. Kaali kindlustuse rajamisele on kulutatud ilmselgelt palju aega ja materjali, kuid kultuurikiht paikneb üllatavalt väikesel alal, leiumaterjal on kasin ning pika perioodi peale hajuv. Need tunnusjooned vihjavad pigem Kaali järve kasutamisest kultuspaigana kui asulana (Lang 2007).

Kaali raudmeteoriidi massiks maapinnani jõudes on interpreteeritud 20–80 tonni (Bronsten *et al.*, 1963), seejuures meteoriitset rauda on leitud ainult kõrvalkraatritest, kuna peakraatri tekitanud meteoriit aurustus kokkupõrkel peaaegu täielikult. Kõrvalkraatritest on ametlikel andmetel leitud ligi 2,5 kg meteoriitset rauda (Spencer 1938, Bronsten 1962, Aaloe 1968), mis

on võrreldes Kaali meteoriidi kogumassiga vaid tühine osa. Üks võimalikest seletustest on meteoriitse raua ära kasutamine raudesemete sepistamiseks Saaremaal, mida antud bakalaureusetöös üritataksegi tõestada.

Näiteks on teada, et Gröönimaa põliselanikud inuitid kasutasid Cape Yorki meteoriiti toorainena raudesemete valmistamisel. Nende isoleeritud elupaiga tõttu ei tundnud nad esmalt kuumtöötlemist, mis on ka peamine põhjus, miks kõik teadaolevad Cape Yorki meteoriidist valmistatud esemed on külmtöödeldud ehk kalestatud. Teiseks külmtöötlemise eelistuse põhjuseks võis olla puidu ja muu kütte puudus Gröönimaal (Narro 2012, *cit.* Buchwald, Mosdal 1985, Buchwald 2005).

Meteoriitsest materjalist valmistatud raudesemete tuvastamisel lähtuti selle erinevustest tavalisest rauast, nimelt sisaldab Kaali meteoriit lisaks rauale veel keskmiselt 7,25% niklit ja väikestes kogustes haruldasi elemente nagu Ir, Ga, Ge, Re, Pt ja Au (Yavnel, 1976). Keemilise analüüsi teostamiseks otsustati kasutada portatiivset röntgenfluorents spektromeetrit, sest see võimaldas mõõtmist teostada arhiivis kohapeal ning ei eeldanud esemete eelnevat ettevalmistust.

Muististe leiukohtade valimisel lähtuti mitmest aspektist. Esiteks pidid kinnismuistised pärinema Saaremaalt, kust võimalike meteoriitsest rauast sepistatud esemete leidmise tõenäosus peaks kõige suurem olema. Lisaks muutuks terve Eestist leidude kaasamine valimisse liialt mahukaks ja aeganõudvaks. Teiseks pidi leiukoht sisaldama raudesemeid, mida saaks mõõta. Kolmandaks piiritleti leiukohtade ajaline pärinevus vaenemast rauaajast viikingiaja lõpuni. Hilisemal perioodil kasvas raudesemete hulk eksponentsiaalselt.

Käesoleva töö eesmärgiks on leida tõendeid Kaali meteoriitse raua kasutamisest Saaremaa sepikodades metallesemete valmistamisel ning määratleda sepiste ajaline kuuluvus ja võimalusel valmistamispaik.

Valimi koostamine Saaremaa muististest

Esimesteks Eesti aladelt leitud raudesemeteks peetakse Asva kindlustatud asula hilispronksiaegsest või rauaaegsest kihistusest ja Iru kindlustatud asula hilispronksiaegsest kihistusest pärinevaid naaskleidid ning Võhma Tandemäe kalmest raudkäävõru eelrooma rauaajast või isegi hilisest pronksiajast (Lang 2007). Eelrooma rauaajast on teada ka dekoratiivseid ehtenõelu, vööpandlaid, kirveid, erinevas suuruses nuge ning mõõk (Lang 2007, *cit.* Jaanits *et al.* 1982). Kahtlemata võivad mõningad esemed Eesti aladele olla transporditud juba valmis sepiena, kuigi Asvast ja Irust on leitud mõningaid šlakitükke, mis vihjavad võimalikule rauatöötlemisele juba pronksiaja lõpus, kuid võivad pärineda ka hilisemast ajast. Arvatavasti eelrooma rauaajast pärinevad esemed on valmistatud imporditud metallist, kuna pole märke sooraua ammutamisest (Lang 2007).

Noorem pronksiaeg ja vanem rauaaeg

Praeguseks on nooremast pronksi- ja vanemast rauaajast (1100 eKr – 450 pKr) teada üle 3000 kinnismuistise, millest ligi 130 moodustavad asulakohad. Lääne-Eestis on kindlustamata asulaid teada vaid väheseid, seejuures Saaremaalt ainult Põide. Kultuurikiht nendes muistsetes asulapaikades on võrdlemisi kasin, metallesemeid ja muid artefakte leidub vähesel hulgal, mis muudab keeruliseks asustuste täpse ajalise dateerimise (Lang 2007). Kindlustatud asulaid on Saaremaal teada kolm, millest valimisse võeti ainult Kaalist pärinevad leiud, kuna teistes puudusid raudesemed või olid need TLÜ Arheoloogiaarhiivist välja laenutatud.

Ülejäänud valitud kinnismuistised on eelkõige matmispaigad. Eestis senini leitud ligikaudu kolmekümnest varajasest tarandkalmest on selle töö valimisse kaasatud Kurevere, Kuninguste ja Lümanda Punapea. Rooma rauaaja lõpust valiti veel Liiva-Putla ja Tõnija Tuulingumäe, mis kuuluvad tüüpiliste tarandkalmete hulka. Lisaks teostati mõõtmised varajasest ehk eelrooma rauaajast (500 eKr–50 pKr) pärinevast Kahtla kivikirstkalmest ning Randvere kangurkalmest, mida on vahelduva eduga ka hilisemal perioodil matmispaigana kasutatud. Põhjalikuma ülevaate saamiseks noorema pronksiaja ja vanema rauaaja asustusest ja kinnismuististest vaata Lang (2007).

Valimisse võetud esemete hulgas domineerisid ehted, eelkõige karjasekeppnõelad (Joonis 1), märkimisväärses koguses esines nuge ja muid väiksemaid terariistu. Üldine leidude seisukord oli rahuldav, kuid enamasti esines esemetel paks korrosioonikiht. Halvemas olukorras olid näiteks Kurevere leiud.



Joonis 1. Karjasekeppnõel Liiva-Putlast.

Keskmine ja noorem rauaaeg

Keskmisest rauaajast ja noorema rauaaja esimesest poolest (450 –1050 pKr) on kokku Eestis kindlalt teada ligikaudu 200 matmispaika (Tvauri 2012). Käesoleva töö tarbeks on raudesemete olemasolu ning arheoloogiakogusid hoiustavatest asutusest kättesaadavuse alusel valitud Saaremaalt antud perioodist kümme kalmet, millest Lepna kalme pärineb rahvastikurännuaajast (450–550 pKr), Leina kalme eelviikingiajast (550–800 pKr) ning Käku, Loona, Piila, Laadjala, Ipla, Räägi ning Rahu on viikingiaegsed (800–1050 pKr). Täieliku ülevaate antud perioodist leiab Tvauri (2012) teoses „Rahvastikurännuaeg, eelviikingiaeg ja viikingiaeg Eestis“.

Keskmisest ja noorema rauaaja esimesest poolest selekteeritud leiumaterjalis oli märkimisväärselt rohkem rauast tööriistu ja relvi kui varajasema perioodi esemete hulgas (Joonis 3). Ülejäänud osa valimist moodustasid mitmesugused ehted.

Võimalike meteoriitsest rauast valmistatud metallesemete leidmise tõenäosuse suurendamiseks otsustati teisena mõõdetud Saaremaa Muuseumi esemetest valimisse kaasata lisaks kinnismuististelt pärinevatele ka juhuleiud, mille puhul pole teada täpset ajalist

dateeringut või ka leiukohta. Kokku mõõdeti seitsekümmend juhuleidu, millest enamuse moodustasid odaotsad (Joonis 2), noad ja kirved.



Joonis 2. Odaotsad Saaremaa juhuleidudest.



Joonis 3. Raudesemed Loona kalmest.

Metoodika

Keemilised analüüsid XRF¹ ja SEM² meetodil teostati Saaremaa Muuseumi ja Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi arheoloogiakogudest pärinevatest raudesemetest, mille ajaline dateering ulatus eelrooma rauaajast (500 eKr–50pKr) viikingiaega (800–1050 eKr). Kuna keemilise analüüsi teostamiseks oli tarvis mittedestruktiivset ja portatiivset aparatuuri, otsustati kasutada Tartu Ülikooli arheoloogia kabinetile kuuluvat kaasaskantavat XRF-i (*portable xray fluorescent spectrometer*–PXRF) Bruker Tracer SD-III. PXRF-iga mõõtes oli kasutusel kollane filter, mis suurendas metallide tundlikkust raskemate elementide suhtes. Kuna Bruker Tracer III-SD kasutab röntgenkiirguse allikana Rh ning lisaks sisaldab mõõtepinna Pd, on need elemendid alati spektris esindatud (Speakman). Keemilist analüüsi teostades loobuti tugevalt korrodeerunud ja liialt ebatasase või kumera pinnaga fragmentidest, kuna adekvaatse tulemuse saamiseks peavad esemed röntgenkiirtega võimalikult lähedast kontakti saavutama. Lisaks loobuti ka liialt väikeste esemete analüüsist. Mõõtmise faasis keskenduti eelkõige nikli sisalduse ning teiste meteoriitsele materjalile vihjavate elementide nagu Ir, Ga, Ge, Re, Pt ja Au (Kracher *et al.*, 1980) otsimisele. Positiivse tulemusega raudesemetest tehti kordusmõõtmised. Hilisem andmetöötlus teostati spektraalanalüüsi

¹ Röntgenfluorestsents spektromeetria (*x-ray fluorescence spectrometry*) on üks levinumaid mittedestruktiivseid meetodeid pinna keemilise analüüsi teostamiseks. Röntgenfluorestsentsanalüüsi eeliseks on vähene ettevalmistuse vajadus ning suhteliselt kiired tulemused. Keemiline analüüs on teostatav tulenevalt aatomite erinevast käitumisest röntgenkiirguse käes. Röntgenkiirgus on lühikese lainepikkusega elektromagnetkiirgus, mille lainepikkus jääb gamma- ja ultraviolettkiirguse vahele. Aine ergastamisel röntgenkiirtega muutub keha ioniseerituks. Saades röntgenkiirguselt piisavalt energiat, muutub siseorbitaali elektron ebastabiilseks ning eraldub ja teda asub asendama välisorbitaalilt pärinev elektron. Selle tulemusena vabaneb energia, sest sisemine elektron on tugevamalt seotud kui välimine. Mõõdetavalt kehast eraldub esialgselt röntgenkiirgusest madalama energiaga fluorestsentskiirgus. Kuna energia erinevus elektronkestade vahel on erinevatel elementidel fikseeritud, siis saab tagasipeegelduva fluorestsentskiirguse lainepikkuse või energia mõõtmisel tuvastada keemiliste elementide sisaldust proovis (Shackley, 2011).

² Skaneeriv elektronmikroskoop (SEM) on aparaat tahkete kehade keemilise koostise, kristallstruktuuri, osakeste orienteerituse ja tekstuuri kindlaks määramiseks. Sellel eesmärgil tekitatakse kõrge energiaga koondatud elektronkiir, mis tekitab omakorda erinevaid signaale tahkete kehade pinnalt. Korraga kuvatakse 20–30000-kordse suurendusega ala, mille laiuseks on üks sentimeeter kuni viis mikronit. Tulemusena on võimalik kuvada kahedimensiooniline mudel, mis kirjeldab mõõtepinna ruumilisi omadusi. Kasutades SEM-is energiadiispersiivset spektroskoopiat, lainediispersiivse analüüsi või tagasi hajunud elektronide difraktsioonanalüüsi, on võimalik ka proovipinda selektiivselt analüüsida (Krinsley *et al.*, 2005).

tarkvaraga Spectra – korrigeeriti elementide massilist sisaldust, eemaldades müra, konteksti mittedobivad elemendid ja aparatuurist endast tekitatud Rh ja Pd fluorestsentskiirgus. Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi arheoloogiakogust pärinevast Kaali asulakoha fragmendist peanumbriga AI 4915 (kuid alanumbrita), teostati lisaks analüüsid SEM-meetodil. SEM-i kasuks otsustati eelkõige fragmendi väikese koguse tõttu. Valiti silmaga hinnates killu kõige siledam tasapind ning koostise varieeruvuse leidmiseks teostati analüüs kaheksast erinevast punktist.

Tulemused

Kokku 370 Saaremaalt pärineva raudeseme keemilise koostise mõõtmisel PXRF meetodil ilmnes üheteistkümnes objektis kõrgenenud Ni ning lisaks ühes neist ka Ge ja Ga sisaldus. Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi arheoloogiakogus asuv esimene võimalikke meteoriidseid elemente sisaldav, kuni ühe sentimeetri suurune, rauast fragment, peanumbriga AI 4915 (Joonis 4) oli leitud Kaali peakraatri asulakoha kaevamisel kaevandatud ruudusurfi 29-30/w; 30/v alumisest mullakihist 1977. aasta väljakaevamistel. Tugevalt fragmenteerunud rauaosakeste pinna analüüsimisel leiti Ni massikontsentratsiooniks kolmest erinevast kohast mõõtes 2,71% (Tabel 1); 1,77% (Tabel 2) ja 1,72% (Tabel 3). Lisaks leidis Ge, mille kolme tulemuse keskmine oli 0,02% ning kolmandas proovis ka 0,01% Ga ja teisi irrelevantseid elemente. Teise, leiunumbriga AI 4915-408 Kaali asulakohast pärineva raudfragmendi (Tabel 4) Ni sisalduseks saadi 0,02%, enamjaolt oli tegu Fe ja Al sulamiga (Tabel 4).



Joonis 4. Kaalist pärinev raudfragment.

Tabel 1. Kaali Nimetu fragmendi
1. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	2311	1,59
Ti	348	0,15
Fe	570934	95,51
Ni	23545	2,71
Zn	252	0,02
Ge	341	0,02
Ge	34	

Tabel 2. Kaali Nimetu fragmendi
2. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	1853	1,05
Fe	704564	97,14
Ni	18658	1,77
Ge	343	0,02
Ge	7	
As	314	0,02
As	15	

Tabel 3. Kaali Nimetu fragmendi
3. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	2690	1,76
Fe	603897	96,48
Ni	15629	1,72
Ga	106	0,01
Ga	32	
Ge	284	0,02
Ge	1	
As	278	0,02
As	55	

Tabel 4. Fragmendi AI 4915-408
keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Al	123	4,31
K	774	0,91
Ca	3975	3,21
Ti	507	0,26
Fe	461994	90,96
Ni	149	0,02
Cu	417	0,05
Zn	1620	0,17
As	1307	0,11
As	15	

Järgnevad neli Ni sisaldusega raudeset pärinevat kõik ühest leiukohast – Ilpla kalmest. Viikingiajast pärinevate esemete olukord oli rahuldav – leiud olid küll korrodeerunud, aga

olemus oli äratuntav. Kolm esimest eset olid noad (Joonis 5), mille Ni massiprotsent oli vastavalt kollektsioonile 0,01% (AIK 1-30) (Tabel 5); 0,02% (AIK 1-31) (Tabel 6); ja 0,03%(AIK 1-38) (Tabel 7). Neljandaks esemeks oli ümara kujuga mõõganupp (Joonis 6) AIK 1-68 0,04% Ni sisaldusega (Tabel 8).



Joonis 5. Ilpla kalmest leiunumbriga 27 ja 30–38 pärinevad noad



Joonis 6. Ilpla kalmest pärinev mõõganupp leiunumbriga 68.

Tabel 5. Noa kohanumbriga AIK 1-30 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	394	0,23
Fe	690435	99,60
Ni	121	0,01
Cu	871	0,08
Zn	755	0,06
As	396	0,02
As	6	

Tabel 6. Noa kohanumbriga AIK 1-31 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	259	0,13
Fe	776478	97,74
Ni	171	0,02
Cu	2063	0,16
Zn	28643	1,90
As	957	0,05
As	10	

Tabel 7. Noa kohanumbriga AIK 1-38 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	329	0,20
Fe	676465	99,51
Ni	266	0,03
Cu	1567	0,14
Zn	785	0,06
As	1070	0,07
As	31	

Tabel 8. Mõõganupu kohanumbriga AIK 1-68 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	716	0,41
Fe	703542	98,86
Ni	455	0,04
Cu	4668	0,40
Zn	3025	0,22
As	1057	0,06
As	-4	

Ülejäänud viis niklisisaldusega raudeset pärinevad Saaremaa Muuseumi juhuleidude hulgastst. Sirgeseljalise noa (Joonis 7), mis pärineb esimese aastatuhande algusest, peanumbriga Sm 2509, koostises on esimeses mõõtmise tulemusena 0,11% ja teises 0,16 % Ni (Tabel 9; tabel 10). Teiseks raudesemeks juhuleidudest on samuti sirgeseljaline nuga (Joonis 8) (Sm 2510) (Tabel 11) 0,14% Ni sisaldusega, mis pärineb samuti esimese aastatuhande algusest. Noa tera ise on tugevalt korrodeerunud ning tükkideks murdunud. Ka kolmas Ni sisaldav raudese, leiunumbriga Sm 57, on nuga, Ni sisaldus on sedapuhku 0,08%,

(Tabel 12) ajaline dateering esemel puudub. Positiivse tulemuse Ni suhtes annab veel raudkett alanumbriga Sm 2572 ja fragmenteerunud mõõk alanumbriga Sm 199. 12. sajandist pärineva mõõga Ni sisaldus on 0,06% (Tabel 13) ning mõlemad ketist tehtud analüüsid annavad tulemuseks samuti 0,06% Ni (Tabel 14; Tabel 15). Juhuleidudele antud ajalised dateeringud pärinevad Eesti Muuseumide Veebivärvast Saaremaa Muuseumi andmebaasist (<http://www.muis.ee/catalogue>).



Joonis 7. Sirgeseljaline nuga (Sm 2509) Saaremaa juhuleidudest.

Tabel 9. Noa kohanumbriga Sm 2509

1. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	629	0,33
Fe	768445	99,34
Ni	1232	0,11
Cu	1353	0,11
Zn	1266	0,09
As	414	0,02
As	113	

Tabel 10. Noa kohanumbriga Sm 2509

2. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	500	0,27
Mn	3504	0,58
Fe	754070	98,75
Ni	1821	0,16
Cu	1030	0,08
Zn	1325	0,09
As	1020	0,06
As	60	



Joonis 8. Sirgeseljaline nuga (Sm 2510) Saaremaa juhuleidudest.

Tabel 11. Noa kohanumbriga Sm 2510 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	373	0,21
Fe	728970	99,44
Ni	1490	0,14
Cu	800	0,07
Zn	933	0,07
As	1441	0,08
As	53	

Tabel 12. Noa kohanumbriga Sm 57 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	302	0,18
Fe	679390	99,55
Ni	824	0,08
Cu	1315	0,12
Zn	604	0,05
As	416	0,03
As	-23	

Tabel 13. Mõõga kohanumbriga 2572 keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	303	0,17
Cr	8153	1,68
Mn	1314	0,22
Fe	731149	97,67
Ni	673	0,06
Cu	1383	0,11
Zn	274	0,02
As	1180	0,07
As	16	

Tabel 14. Raudketi kohanumbriga 2572

1. keemiline analüüs.

Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	363	0,36
Fe	415207	99,28
Ni	334	0,06
Cu	1081	0,16
Zn	1023	0,13
As	184	0,02
As	4	

Tabel 15. Raudketi kohanumbriga 2572

2. keemiline analüüs.

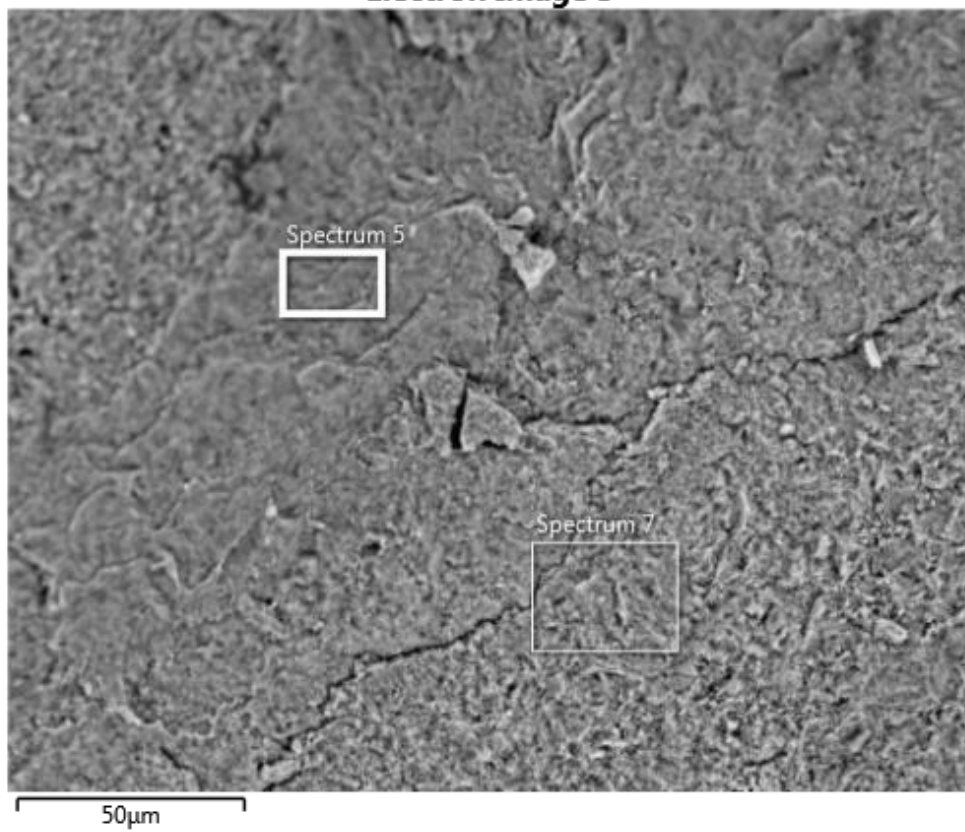
Keemiline element	Neto	Kontsentratsioon (%)
Ca	289	0,25
Fe	478037	99,41
Ni	382	0,06
Cu	1067	0,14
Zn	1132	0,12
As	332	0,03
As	3	

Kaali muistsest asulakohast pärinevast fragmendist AI 4915 (Joonis 4) tehtud SEM analüüsist vaatlesin eelkõige Fe, Ni ja Ir kontsentratsioone. Fragmendi nikli sisaldused kõiguvad vahemikus 1,19–10,52% (Tabel 16). Kõige madalama Ni sisaldusega oli spekter number viis (Joonis 9), proovi pind oli võrreldes teiste spektritega keskmise heledusega ning suhteliselt sile, kui välja arvata mõningad lõhed. Kõige rohkem leidis Ni kaheksandas spektris (Joonis 10), mille pind oli keskmise krobeldusega ning teiste spektritega võrreldes kõige tumedam. Spekter number üks ja kaks (Joonis 11) olid mõlemad heledama pinnaga, esimene oli plaatjas ja sile ning teine tugevalt krobeline. Spekter number kolme ja nelja (Joonis 12) pind oli keskmise heleduse ja krobeldisusega. Seitsmes spekter (Joonis 9) oli heleduselt sarnane spekter kolme ja neljaga, kuid pinna tekstuur oli tunduvalt karedam. Kuuenda spektri kujutis läks töö käigus kaotsi.

Tabel 16. Kaalist pärineva raud fragmendi keemiline koostis.

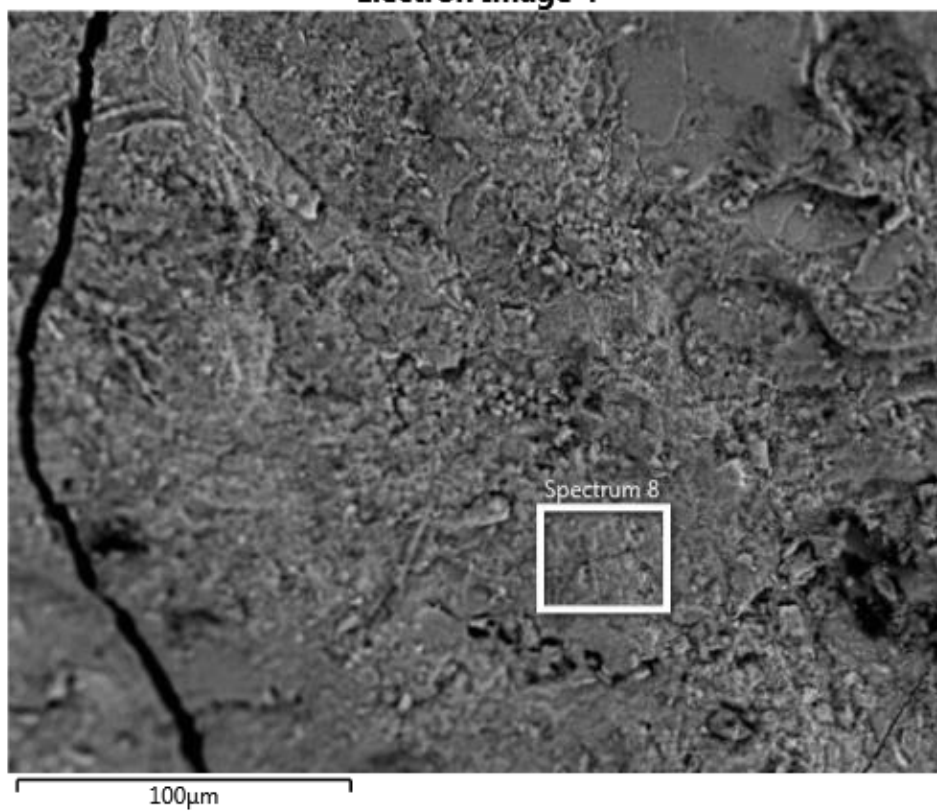
	Keemilise elemendi sisaldus (%)							
Keemiline element	Spekter 1	Spekter 2	Spekter3	Spekter 4	Spekter 5	Spekter 6	Spekter 7	Spekter 8
C	3,1	1,25	3	4,88		1,74	1,55	4,64
O	27,64	10,74	25,79	28,8	2,52	16,22	21,75	18,21
Na			0,05					
Mg	0,05	0,08	0,12	0,2				0,19
Al	0,05	0,2	0,06	0,44				0,29
Si	0,82	0,4	0,86	1,54			0,18	1,46
P	0,29		0,44	0,45				
S	0,01		0,01					0,1
Cl	0,13		0,07	0,13				0,29
K	0,06			0,16				
Ca	0,37		0,31	0,54				0,65
Mn	0,03							
Fe	62,19	85,38	65,42	59,71	96,29	78,2	73,34	63,39
Ni	5,25	1,95	3,88	3,15	1,19	3,85	3,18	10,52
Ir								0,26
Kokku	100	100	100	100	100	100	100	100

Electron Image 3



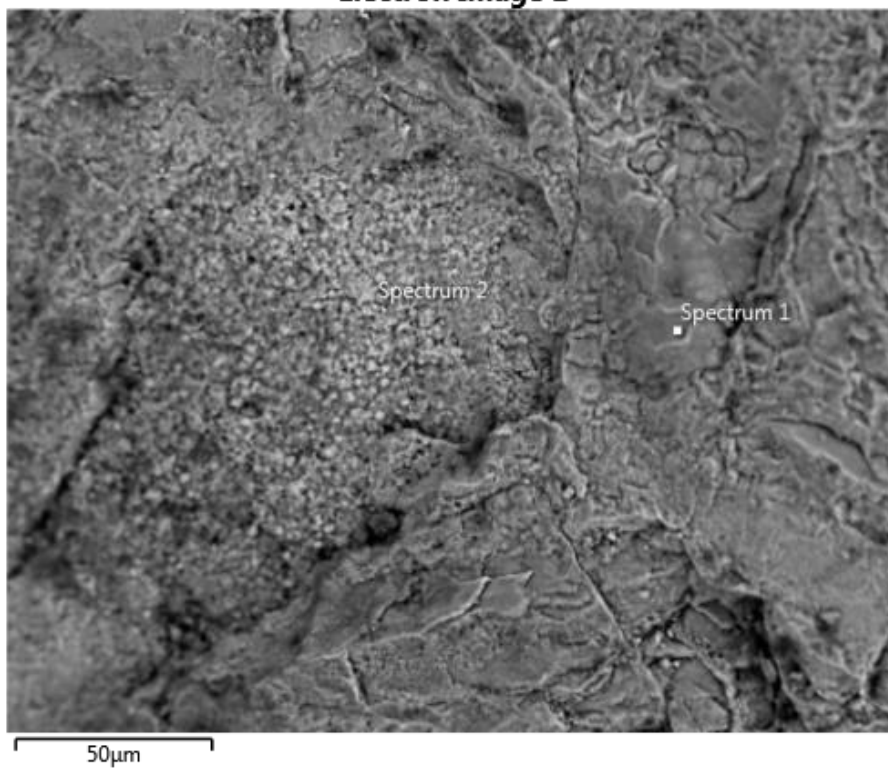
Joonis 9. Spekter 5 ja 7 Kaalist pärinevast raud fragmendist.

Electron Image 4



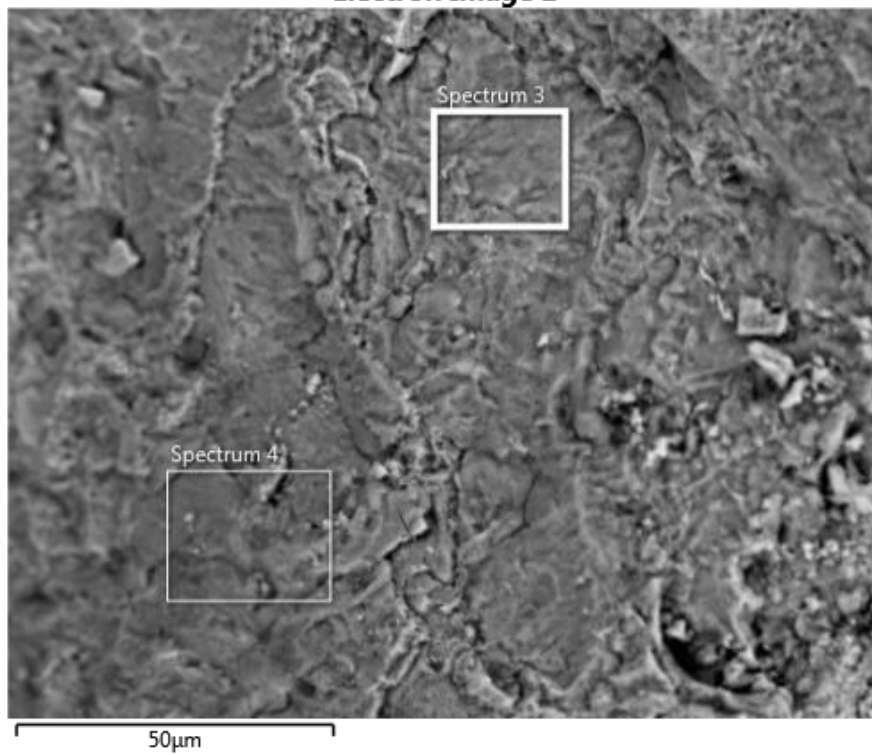
Joonis 10. Spekter 8 Kaalist pärinevast raud fragmendist.

Electron Image 1



Joonis 11. Spekter 1 ja 2 Kaalist pärinevast raud fragmendist.

Electron Image 2



Joonis 12. Spekter 3 ja 4 Kaalist pärinevast raud fragmendist.

Arutelu ja järeldused

Kokkuvõttes ilmnes võimalikule meteoriidsele rauale vihjav Ni üheteistkümnes mõõdetud raudesemes. Kui vaadata esemete ajalist kuuluvust, saab tulemused jagada kolme perioodi. Kõige vanemad rauafragmendid pärinevad Kaali muistsest asulakohast (760–210 eKr). Vähima vanusega on Ilpla noad ja mõõganupp, mis pärinevad Viikingiajast (800–1050 pKr) ja millele võiks tinglikult lisada juhuleidudest pärineva mõõga, mille ligikaudne dateering Saaremaa muuseumi arhiivi andmebaasis vastab 12. sajandile. Nende vahele jäävad ajaliselt esimese aastatuhande algusest pärinevad kaks nuga Saaremaa juhuleidudest. Viimasel kahel juhuleiul kahjuks ajaline dateering puudub.

Tähelepanu tekitab ka see, et üheteistkümnest leiust on kaheksal juhul tegemist terariistaga. Narro (2012) täheldas, et meteoriitne raud on tänapäevasest süsinikterasest tunduvalt pehmem, tugevust sai lisada ainult külmtöötlusel ehk kalestamisel, ja sellest terariistade valmistamine ei pruugi olla kõige otstarvekam. Samas suutis Narro oma töös edukalt ääskeevitusel meteoriitset ning tavalist süsinikrauda kokku liita – tulemused olid piisavalt head, et materjalist võiks ka terariistu valmistada. Sellisel moel võidi meteoriitset rauda kasutada näiteks damasseeritud terariistade valmistamiseks. Kuna esemete pinnad, millele käesoleva töö käigus keemilised analüüsid teostati, olid keskmiselt kuni tugevalt korrudeerunud, ei olnud võimalik välisel vaatlusel damasseeringut tuvastada.

XRF meetodil leitud kõrgeim niklisisaldus, mis pärines Kaali asulakohast, oli 2,71%, ülejäänud analüüsitud metallesemete Ni sisaldus piirdus maksimaalselt aga 0,16%, mis on võrreldes Kaali meteoriidi koostisega tühiselt väike kogus. Taoline erinevus tekitab kahtlusi, kas antud Ni fraktsioonid võivad üldse Kaali meteoriidiga seotud olla. Näiteks Narro magistritöös veenduti, et kuumutamisel ei põlenud meteoriitsest rauast nikkel välja. Nikli kaaluprotsent muutus ainult vähesel määral isegi mitmel järjestikusel kuumutamisel.

Üks võimalik põhjendus vähesele Ni sisaldusele, eelkõige terariistade puhul, võib olla damasseerimis-meetodi kasutus. Tera painduvuse tagamiseks võis pehmemast meteoriitrauast valmistatud olla ainult terade tuumik, mille pind on kaetud tavalise ja tugevama rauaga. Teiseks põhjuseks võib olla vaatlusaluste esemete pinna tugev korrosioon. Nende väidete kontrollimiseks tuleks leitud Ni sisaldusega esemetest teha mikrolihv ning uued keemilised analüüsid.

Raudfragmendist AI 4915 tehtud SEM meetodil analüüs näitab suurt Ni sisalduse kõikumist vahemikus 1,19–10,52%. Nikli massiprotsendi erinevus eri punktides võiks olla põhjendatud

antud fragmendi ebaühtlasest, kuid üldiselt väga tugevast korrodeerumisest. Samas, kuna tegu on väga halvasti säilinud materjaliga, mis ei sarnane väliselt ühelegi esemele, pole ka välistatud, et tegu pole sepietatud raudesemega vaid algse meteoriidi tükiga. Analüüsitud pinna punktide tekstuuri ja heledusastmega ei leitud korrelatsiooni nikli sisaldusega.

Hetkel jääb arusaamatuks, miks Kaali meteoriitsele rauale sarnase koostisega raudesemeid leidub valitud Saaremaa muististest nii väheses koguses. Võimalik võib olla, et meteoriitne raud transporditi Saaremaalt välja, kuna meteoriitne raud oli võrreldes soorauaga kergesti kättesaadav ning nõudlus rauajärgi kasvav. Pole ka välistatud, et Kaali meteoriiti kasutati muinasaegses farmaatsiatööstuses müstilise imerohuna. Näiteks on teada, et 1886. aastal Venemaale Novõi Ureisse langenud meteoriit jahvatati peeneks ja söödi sisse ravieesmärgiks. Sarnaselt toimiti 1918. aastal Kašinasse langenud meteoriidiga (Narro 2012, *cit.* Karik 1984). Lisaks ei saa välistada ka võimalust, et Kaali meteoriit oli tunduvalt väiksem kui interpreteeritud, ning allesjäänud fragmendid roostetasid ajapikku ära.

Kokkuvõte

Käesolevas bakalaaurusetöös uuritakse Kaali meteoriitse raua võimalikku kasutamist Saaremaa sepikodades. Töö eesmärgiks oli määratleda võimalike Kaali meteoriitsest rauast sepistatud esemete ajaline kuuluvus ning võimalusel valmistamispaik. Selleks tehti XRF ja SEM meetodil 370 Saaremaa Muuseumist ja Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi arheoloogiakogudest pärinevatest leidudest keemilised analüüsid. Valitud esemete keemilist koostist, eelkõige nikli sisaldust, võrreldi Kaali meteoriitse rauaga.

Tulemusena tuvastati üheteistkümne eseme koostises niklit. Raudesemed pärinesid Kaali asulakohast (760–210 eKr), Ilpla kalmest (800–1050 pKr) ja juhuleidudest, millest osad pärinesid esimese aastatuhande algusest ning üks 12. sajandist. Lisaks kahel raudesemel ajaline dateering puudus. Antud raudesemete nikli sisalduse ja Kaali meteoriidivahelise seose kinnitamiseks tuleb tulevikus teostada täiendavad keemilised analüüsid esemete lihvitud pinnast.

Tänuõnad

Eelkõige sooviks tänada oma juhendajat Jüri Pladot asjakohaste soovitude eest ja Kristiina Paavelit nõustamises arheoloogiat puudutavates küsimustes ning Külli Rikast abi eest Saaremaa Muuseumi arhiivis.

Kasutatud kirjandus

- Aaloe A. 1963. On the history of study of Kaali meteorite craters. Eesti NSV Teaduse Akadeemia Geoloogia Instituudi uurimused 11:25–34. In Russia.
- Aaloe A. 1968. Kaali meteorite craters, Tallinn: Eesti Raamat: 48.
- Bronsten V.A. 1962. On the fall of the Kaali meteorite, *Meteoritika* 22: 42–46.
- Bronsten V.A., Stanyukovich K.P. 1963. On the fall of Kaali meteorite, Eesti NSV Teaduse Akadeemia Geoloogia Instituudi uurimused 11: 73-83.
- Kessel H. 1981. How old are the bottom deposit of Lake Kaali. Eesti Loodus 24:231–235. In Estonia.
- Kracher A., Willis J., and Wasson J.T. 1980. Chemical classification of iron meteorites-IX. A new group (IIF), reason of IAB and IIICD, and data on 57 additional irons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44:773–787.
- Krinsley D.H., Pye K., Boggs Jr. S., Tovey N. K. 2005. Backscattered Scanning Electron Microscopy and Image Analysis of Sediments and Sedimentary Rocks. Cambridge University Press: New York, NY. 193 lk.
- Lang V. 2007. Pronksiaeg ja vanem rauaaeg Eestis, Eesti Arheoloogia 3, Tartu Ülikooli press.
- Passey Q.R. and Melosh H.J. 1980. Effects of atmospheric breakup on crater field formations. *Icarus* 42:211-233.
- Rasmussen K.L., Aaby B. and Gwozdz R. 2000. The age of the Kaali meteorite craters. *Meteoritics & Planetary Sciences* 34:1067–1071.
- Raukas A. 2000. Study of meteoritematter for precise regional stratigraphy. *Geologos* 5:77–86.
- Raukas A., Tiirmaa R. 1995. Distribution of spherules around the Kaali craters (Saaremaa island, Estonia), Institute of Geology, Estonian Academy of Sciences: 29.
- Raukas A., Pirrus R., Rajamäe R. and Tiirmaa R. 1995. On the age of meteorite craters at Kaali (Saaremaa Island, Estonia). *Proceedings of Estonian Academy of Sciences. Geology* 44:177–183.

- Raukas A., Punning, Moora T., Kestlane Ü. and Kraut A. 2005. The structure and age of Kaali main crater Island of Saaremaa, Estonia. In *Impact tectonics*, edited by Koeberl C. And H. Henkel. Berlin: Springer. Pp. 341–355.
- Reinwald J.A. 1937. Kaalijärv – The meteorite craters on the island on Ösel (Estonia), Tartu Ülikooli Geoloogia Instituudi toimetused No 55: 6, 7.
- Saarse L., Rajamäe R., Heinsalu A. and Vassiljev J. 1991. The biostatigraphy of sediments deposited in Lake Kaali meteorite impact structure, Saaremaa island, Estonia. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 63:129–139.
- Shackley, M.S. 2011. X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarcheology: 7, 16.
- Speakman S.A. Using the Bruker Tracer III-SD Handheld X-Ray Fluorescence Spectrometer, using PC Software for Data Collection.
- Spencer L.J. 1938. The Kaalijärv meteorite iron from the Estonian craters, *Mineralogical Magazine*, London, Vol XXV, Nr 161: 75–80.
- Tiirmaa R. 1994. Kaali meteoriit, *Eesti Teaduse Akadeemia Geoloogia Instituut*: 11.
- Tvauri A. 2012. The Migration Period, Pre-Viking Age, and Viking Age in Estonia, *Estonian Arheology* 4, Tartu University Press.
- Veski S., Heinsalu A., Kirsimäe K., Poska A. and Saarse L. 2001, Ecological catastrophe in connection with the impact of the Kaali meteorite about 800–400 BC on the island of Saaremaa, Estonia. *Meteoritics & Planetary Science* 36:1367–1375
- Veski S., Heinsalu A., Lang V., Kestlane Ü. and Possnert G. 2004. The age of Kaali meteorite craters and the effect of the impact on the environment and man: Evidence from inside the Kaali craters, island of Saaremaa, Estonia. *Vegatation History and Archaeobotany* 12:197–206.
- Yavnel A.A. 1976. On the composition of meteorite Kaalijärv. *Astronomicheskii estnik* 10: 122–123.
- Yudin I.A., Smyshlyayev S.I. 1936. Mineragraphic and chemical studies of Kaali iron meteorite, *Eesti NSV Teaduse Akadeemia Geoloogia Instituudi uurimused* 11:53–59. In Russia.

Summary

Possible usage of Kaali meteorite in smitheries of Saaremaa

The current research examines the possible usage of Kaali meteorite iron for producing iron items in Saaremaa. The purpose of this thesis is to define the possible dates and forging places of these iron items. The chemical analyses with items from the Saaremaa Muuseum and The Institute of History of The Tallinn University were made by SEM and XRF method. The chemical composition of these items were compared with the Kaali meteoritic iron, with special attention to nickel. The results showed nickel in eleven iron items. The objects were originated from the Kaali settlement (760–210 BC), burial site of Ilpla (800–1050 AD) and random findings, from which some originated from the beginning of the first millennium and from the 12th century. The datings of two iron items were missing. For future research to confirm the connection between the Ni content in these items and the Kaali meteorite iron additional chemical analyses from the polished surface of these items are needed.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Tamm

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kaali meteoriidi võimalik kasutamine Saaremaa sepikodades“, mille juhendaja on Jüri Plado,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 23.05.2014